

ジョセフソン接合を機能素子として用いた超電導論理回路は、半導体技術が直面しつつある配線遅延による動作速度の制限という問題を本質的に解決できる可能性を秘めている。酸化物高温超電導体を用いた超高速論理回路の実現を旨とし、スイッチング時間が1.6ピコ秒のジョセフソン接合を開発し、この接合を用いて構成した、単一磁束量子形式のフリップフロップ回路が正しく動作することを実証した。超高速動作が要求される通信分野などへの適用を期待している。

Superconductive logic circuits utilizing Josephson junctions as the active devices are expected to operate at far higher frequencies than conventional semiconductor circuits, in which wiring delay is becoming a serious problem.

We have fabricated Josephson junctions with a switching time of 1.6 pico-second using high-temperature superconductors. Flip-flop circuits utilizing the Josephson junctions were confirmed to operate correctly.

## 1 まえがき

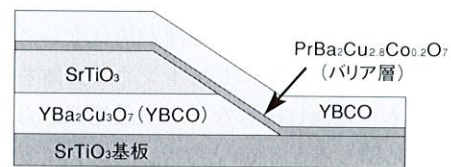
超電導体を用いた論理回路は、高速動作という観点から見て、従来の半導体技術に比べて二つの利点をもつ。それらは、①ジョセフソン接合という低インピーダンスの高速スイッチング素子が実現できること、②超電導伝送線路を配線として、高速の電気信号を損失・分散を生ずることなく、光に近い速度で伝達できること、である。

出力インピーダンスの高い半導体素子では、単体としてのスイッチングがいかに速くても、超電導伝送線路との整合がとれず、②の利点が生かせない。この結果、回路としての遅延時間は配線の容量と素子のインピーダンスで決まるCR時定数で制限されてしまう。超電導論理回路は、このような現行の半導体技術が直面しつつある配線遅延の問題を本質的に解決できる可能性を秘めている。

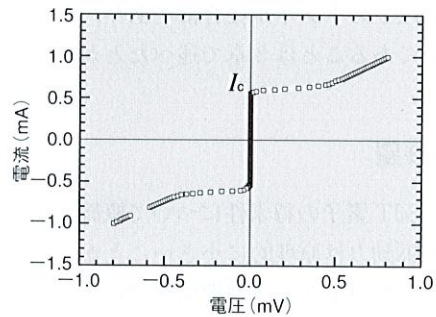
## 2 高温超電導ジョセフソン接合

図1に高温超電導体を用いたジョセフソン接合の構造と電流-電圧特性を示す。ジョセフソン接合は、二つの超電導体電極間にバリア層と呼ばれる薄い絶縁体をサンドイッチした構造をもつ。今回開発した接合では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を超電導電極とし、絶縁性の高い、 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_7$ をバリアに採用した。また、バリア層を10nmまで薄くして超電導電流を担うクーパ対のトンネル確率を高め、接合を流れる超電導電流の最大値( $I_c$ )を向上させた。

ジョセフソン接合を用いた論理回路では、 $I_c$ 以上の電流を信号として加えることで、0電圧状態と電圧発生状態の間のスイッチングを行わせる。この場合のスイッチング時



(a) ジョセフソン接合の構造



(b) 電流-電圧特性

図1. 高温超電導ジョセフソン接合の構造と電流-電圧特性 接合を傾斜したエッジ上に作製し、微細化を可能とした。 $I_c$ 以下の電流では接合には電圧は発生せず、 $I_c$ 以上の電流では抵抗 $R_n$ の常伝導特性に漸近する。

Structure and current-voltage characteristic of Josephson junction

間 $\tau$ は、電圧発生時に接合内部で生じている電流振動(acジョセフソン効果)の時定数で制限される<sup>(1)</sup>。電圧発生時の接合抵抗を $R_n$ とすると、 $\tau(\text{ps})=2.07/I_c R_n(\text{mV})$ であり、今回の接合の $I_c R_n$ 積(1.3 mV)から想定される値は1.6 ps(ピコ秒)程度である。

## 3 論理回路技術

ジョセフソン接合は高速のスイッチングだけでなく、“量



子化された電圧パルス”を発生できるという特長をもつ。電圧  $V$  を発生している接合では、二つの超電導電極間のクーパー対の位相  $\phi$  が、

$$d\phi/dt = 2e/\hbar \cdot V(t) \quad (1)$$

で時間的に変化している。ここで  $e$  は電子電荷、 $\hbar$  はプランク定数( $h$ )/ $2\pi$ である。位相  $\phi$  を  $2\pi$ だけ変化させ、接合を超電導状態から電圧発生状態にし、再び超電導状態に戻す、という過程を考えると、この過程の間に発生する電圧パルスは(1)式から、

$$\int V(t) = h/2e \quad (2)$$

の関係式を満たす。電磁誘導の法則では、(2)式は、スイッチングの過程で  $h/2e$  だけの磁束(磁束量子)が接合を通過したことを意味する。前述したスイッチング速度は、この磁束量子の通過時間、あるいは、発生する電圧パルスの幅に相当するものである。

ジョセフソン接合を用いた論理回路では、磁束量子に情報媒体の役割を担わせ、その、伝播(ば)・分岐・保持などを組み合わせて論理演算を行う<sup>2)</sup>。別の見かたをすれば、これはジョセフソン接合の発生する電圧パルスだけで論理動作を行わせるものであり、半導体技術で一般的となっている、電圧の高低で1、0判定を行う方式とは根本的に異なっている。

図2は、今回試作したフリップフロップ回路の電子顕微鏡写真とその等価回路である。“SET”端子から入力信号を入れるとJ1で示した接合がパルスを発生し、同時に、J1とJ2をつなぐ超電導配線で作られたループ内に磁束量子が一つ侵入して補足される。この磁束量子は、J3、J4の接合とそれらをつなぐ配線ループで構成される磁気センサ部(SQUID: Superconductive QUantum Interference Device)で検知され、電圧信号として出力される。この状態で、“RESET”端子に信号を入力すると、補足されていた磁束

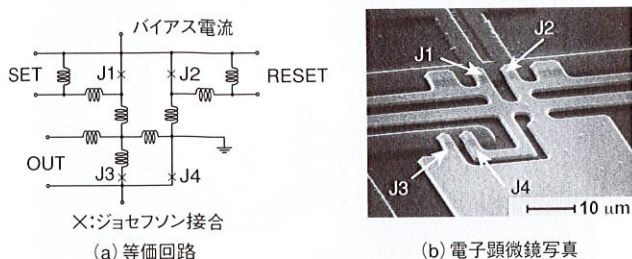


図2. 超電導フリップフロップの等価回路と電子顕微鏡写真 J1からJ4がジョセフソン接合を表わす。

Equivalent circuit and SEM photograph of superconductive flip-flop circuit

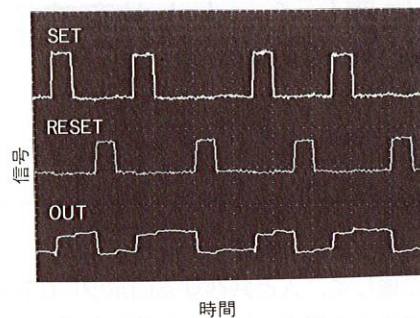


図3. 超電導フリップフロップの動作 SET信号で出力が発生し、RESET信号で0に復帰する。

Operation of flip-flop circuit

量子は排出され、出力電圧は0に復帰する。図3に、この論理動作を測定した結果を示した。発生電圧がmV程度であるため、ピコ秒オーダのスイッチング現象を直接測定することはできないが、正しい論理動作が行われていることが確認できた。

#### 4 あとがき

高温超電導ジョセフソン接合を用いた論理回路は、半導体では到達できない超高速動作を可能にするものと期待されている。しかし、その開発は緒についたばかりであり、製造技術、回路設計技術などで、解決すべき課題は多い。今後、集積技術を高めていくなかで、これらの課題を克服し、21世紀にはいっそうの超高速動作が要求される通信分野などへの適用を図っていきたい。

#### 謝辞

この研究は、通商産業省産業科学技術研究開発制度の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から新機能素子研究開発協会(FED)を通じて委託された“高温超電導素子の研究開発”の成果である。

#### 文献

- 石田 品, 他: 超伝導集積回路, 第1章, 電子通信学会, (1983)
- K. K. Likharev and V. K. Semenov: RSFQ Logic/Memory Family: A New Josephson-Junction Technology for Sub-Terahertz-Clock-Frequency Digital Systems, IEEE Trans. Appl. Supercond., 1,1, pp.3-28(1991)



吉田 二郎 Jiro Yoshida, D. Sc.

研究開発センター 基礎研究所研究主幹, 理博。  
高温超電導体を用いたデバイス・回路の研究開発に従事。  
Advanced Research Lab.